

# 不完全加工複合材料の破壊

福田 博・河田 幸三

## On the Fracture of Composites Containing Broken Fibers by Imperfect Processing

By

Hiroshi FUKUDA and Kozo KAWATA

**Abstract:** When a tensile loading is applied to a unidirectionally reinforced material including a discontinuous fiber by imperfect processing, a crack initiates at the neighborhood of the end of the broken fiber and it propagates in the matrix. The crack propagates either 1) in the direction perpendicular to the fiber axis or 2) along the interface of the fiber and matrix.

In the present paper, the above-mentioned patterns of crack propagations are simulated using finite element method under the assumption of the matrix being elastic and brittle. Interfacial shear stress and maximum principal stress are used for the fracture criteria of the matrix. The facts that the former corresponds to 1) and the latter to 2) are found. The numerical results showed the same patterns of fractures as those obtained by experiments.

### 概 要

複合材料の繊維末端部から生じるクラックの発生と進行の模様について、有限要素法による数値実験を行なった。二つの破壊基準を用いることにより、モデル実験であらわれた二つの破壊のパターンを作り出すことができた。隣接する繊維がクラックの進行をとめる作用をするかどうかとも検討した。

### 1. 序

繊維強化複合材料は、1940年代にグラスファイバーと樹脂の組み合わせ材料が出現して以来、航空宇宙分野をはじめ、建築、レジャー、日用品など広範な分野で活用されている[1]。さらに今日、カーボン、ボロン、各種ウイスキーの開発、また金属マトリックスなどの開発がすすみ、鋼より強くアルミより軽い材料として、また耐熱材料としてその将来が期待されている。反面、繊維そのものに強度のバラツキがある、成形方法にも従来の金属とは異なった成形が必要である、繊維中に不連続繊維があった場合にそれが応力の集中源として作用するなど、今後解決されなければならない問題も数多くある。

複合材料の破壊の問題も、今後解明されなければならない問題の一つである。たとえば、連続繊維一方向強化とは言っても、完全に加工された材料を得ることは不可能に近く、一定の割合で不連続繊維が混入していることを覚悟しなければならない。また、短繊維強化材は、はじめから多くの繊維末端を含む。そのような不完全加工材を引張った場合、繊維を横切る方向の破壊と同時に、繊維とマトリックスの界面に沿った剥離 (debonding) が認められる[2],[3]。いわゆる“pull out”[4]~[6]と称されるものも後者の破壊の一例である。前者の破壊様式は破断に直接つながるものであり、一般の材料にも認められるものであるが、後者は引張り方向にクラックが進むものであり、一般の材料には認められない。

筆者らは、短繊維強化材を繊維方向に引張ったときの内部応力状態を知る目的で、アルミ合金/エポキシ、アルミ合金/ポリウレタンの組合わせのモデルを作り、引張り実験を行なった[7]。その時に得られた各種の破壊のパターンを図1に示す。図1の破壊のパターンは大別して、引張り方向にほぼ垂直な方向の破壊と、繊維とマトリックスの界面に沿った剥離

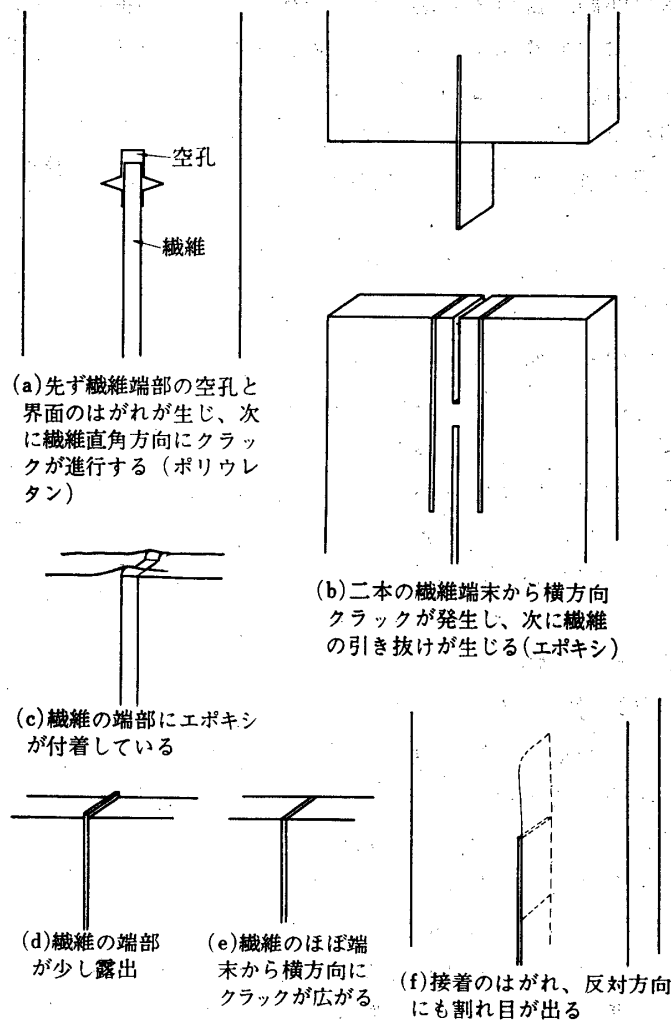


図1 破壊の各種パターン

およびその組合せとなる。そもそも複合材料の破壊の発生の問題は、それぞれの材料の組合せについて微視的な立場すなわち、界面の接着の工合はどうかといった見地から論ずべき問題であり、大きく拡大した、しかも現実の材料の組合せでないモデルにおける破壊のパターンがそのまま現実の複合材料に適用できると考えるのは早計であるが、本論では複合材料の破壊を論じるに至る第一段階として、理想化したモデルにおける破壊の進行状況を調べる。有限要素法によって図1に示されるような破壊の諸種のパターンが説明できるかどうかを調べるのが本論の第一の課題である。また、不連続繊維強化材は、その繊維末端部における応力集中がクラックの発生源 (crack source) となるが、同時に隣接する繊維がクラックの伝播を阻止するもの (crack arrester) として作用するはずである。本論の第二の課題はこの“隣接する繊維が crack arrester として働らく”という現象が有限要素法によって確認できるかどうかを調べることである。

## 2. 解 析

有限要素法を破壊の問題に適用する際に用いた仮定は以下の通りである。

(1) マトリックスは塑性変形を起さず、脆性破壊をすとする。十分に硬化させたエポキシなどは塑性変形をあまり示さないと言われており、エポキシ等をマトリックスに使用する場合にはこの仮定は現実離れしたものではないと思われる。

(2) 破壊は実際には二次元的に言えば線として (三次元的には面として) 進行するが、ここではある要素が破壊の基準値に達すると、その要素 (二次元的には面、三次元的には体) は力をうけもたなくなるとする。力をうけもたないということを計算機の中ではその要素のヤング率が非常に小さくなるということによって表現してある。要素の分割があくまでも有限であるため、この仮定は実際のクラックの進行の様相を忠実に表現しているとは言えず、特にクラック先端の形状、応力集中などの考察は不十分である。

(3) エポキシなどの破壊は一般にはほぼ瞬間的に起り、動的な現象であるが、ここでは準静的なものとして扱い、また、クラックの成長の安定、不安定については考慮しない。

(4) 平面応力、微小変形の場合に限定する。

以上の大胆な仮定のもとに、モデルを徐々に引張っていき、破壊基準に達した要素から順次“破壊”させて行き、破壊の進行の様子を見る。

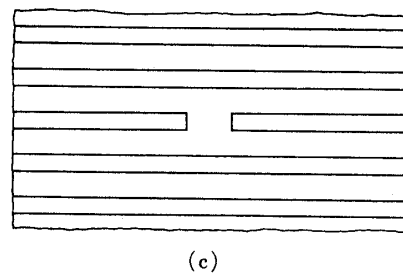
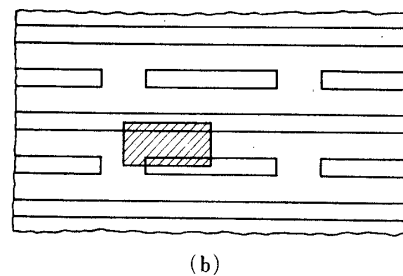
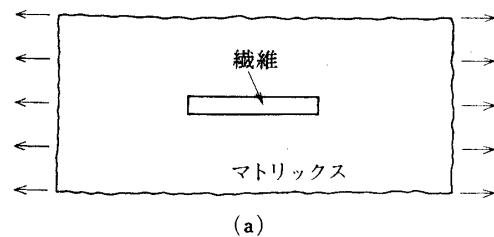


図2 解析モデル

なお、モデルはグラス/エポキシを想定し、 $E_f=7,000 \text{ kg/mm}^2$ 、 $E_m=350 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\nu_f=0.3$ 、 $\nu_m=0.35$  とした。

モデルとしては、図2(a)および(b)を考えた。(a)は、図1にも多くあらわれているように、複合材料の最も基本のモデルである。また、不連続繊維付近の破壊の発生と進行という点から言えば、図2(b)ではなく、(c)のモデルが望ましいと思われるが、有限要素法は数多くの繊維のはいったモデルを解析するのは苦手であり、次善の策として、図2(b)のように、連続繊維と短繊維が組み合わされたモデルを考えた。これは図中に斜線で示す領域がくり返しのユニットであり、この部分だけを解けば良い。

次に、マトリックスの破壊基準としては、マトリックス中の最大引張り応力および界面剪断応力を選んだ。

### 2.1 単一短繊維の場合

本項では二つの破壊基準について、破壊の進行方向を考える。まず、要素の分割を図3に示す。

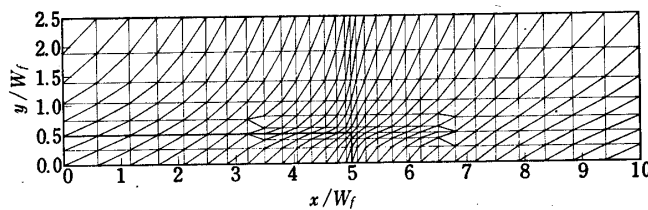
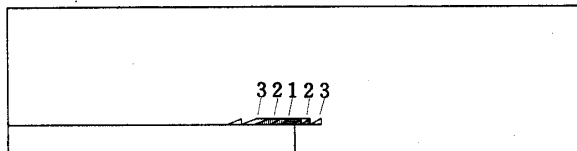


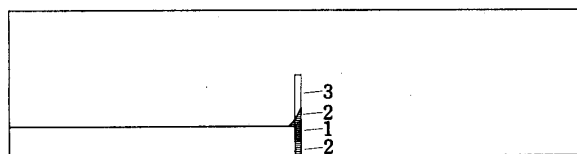
図3 単一短繊維モデルの分割

#### (a) 界面剪断応力が破壊を規定する場合

複合材料が破壊する要因の一つに、繊維とマトリックスの界面の接着のはがれがある。これは複合材料独特の破壊パターンであり、興味がある。ここでは要素の剪断応力 $\tau_{xy}$ がある基準値 $\tau_0$ に達したときその要素が破壊するとして計算を進めた。その計算によって得られた破壊の進行図を図4(a)に示す。ここで注目すべきことは、破壊が繊維末端から繊維とマトリックスの界面に沿って繊維の中心方向に進むのみならず、マトリックス側にも進行することである。これと同じパターンが図1(f)にあらわれている。



(a) 破壊基準 A



(b) 破壊基準 B

図4 破壊の進行 (単一短繊維)

#### (b) 最大引張り主応力が破壊を規定する場合

平面応力状態における最大主応力は、

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

である。これを破壊基準にとり、各要素の最大主応力を計算し、これがある基準値 $(\sigma_{\max})_0$ に達した要素から順に力をうけもたなくなるとして破壊の進行を求め

たのが図4(b)である。実験では図1(e)がこれと同じパターンを示しており、図1(b)も破壊の初期にはこのパターンに属するものと思われる。

図1(c)は二次元の有限要素法で解明することは不可能であるが、(a)と(d)は同じ類型に属すると思われる。すなわち、図1(a)、(d)は界面の接着のはがれがある程度起った後、繊維に直角方向にクラックが進行しており、本項(a)、(b)の破壊基準を単独で用いたのではこのようなパターンはあらわれないが、材料の接着強度はいくら、引張りに対してはここまで耐えるといった工合に破壊基準を組み合わせれば、図1(a)、(d)のような破壊のパターンが説明できる可能性がある。

## 2.2 連続繊維—短繊維の組み合わせの場合

本項では破壊の進行方向と同時に、隣接する繊維が、crack arrester として働くかどうかを調べる。計算のプロセスは2.1と同様である。図2(b)の斜線部のユニットの分割を図5に示す。

### (a) 界面剪断応力が破壊を規定する場合

2.1と同様の考え方に従って計算して得られた破壊の進行の様態を図6(a)に示す。この破壊基準に従うと破壊は繊維に沿ってすすみ、隣接する繊維に到達することがない。従って隣接する繊維がcrack arrester として働らくかどうかを直接論ずることはできない。

次に、破壊が進行するにつれて応力—歪線図がどう変化するかを図7に破壊基準(a)として示した。図中、 $\bar{\sigma}_{x1}$ 、 $\bar{\epsilon}_{x1}$ は、最初の要素が破壊基準(ここでは $\tau_0$ )に達したときの複合材

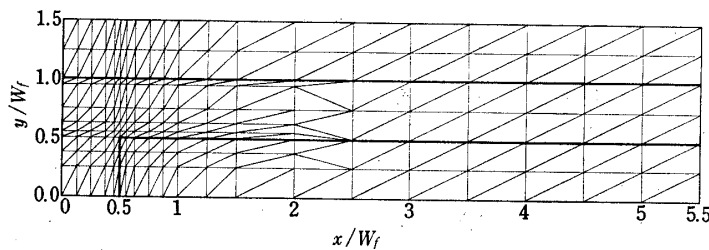


図5 破断繊維モデルの分割

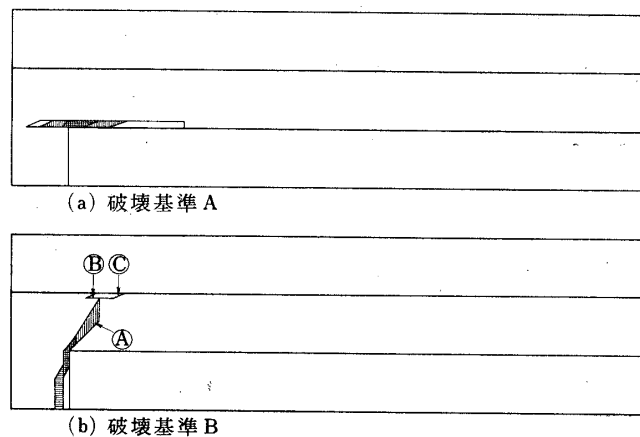


図6 破壊の進行

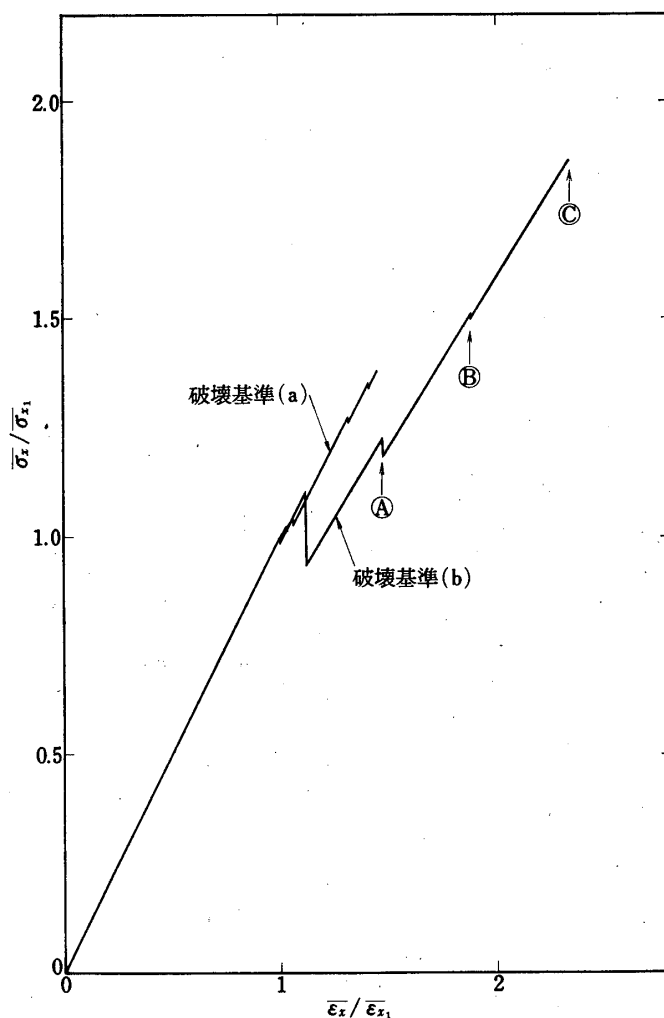


図7 応力-歪線図

料全体の  $x$  方向の平均応力，平均歪であり，縦軸および横軸は複合材料の  $x$  方向の平均応力，平均歪を  $\bar{\sigma}_{x1}$ ， $\bar{\epsilon}_{x1}$  で割った量で表示してある．この応力-歪線図によると，界面の接着が部分的にはがれても，ヤング率には，大きな変化がないことになる．なお，図7の立ち上がりのヤング率，すなわち，最初の要素が破壊に至るまでのヤング率は  $3720 \text{ kg/mm}^2$  である．連続繊維強化の場合には  $4580 \text{ kg/mm}^2$  である．

(b) 最大引張り主応力が破壊を規定する場合

破壊の進行の様態を図6(b)に示す．この破壊の進行の様態は図4(b)の単一短繊維の場合と若干異なる．

次に，この破壊基準の場合の応力-歪線図を図7に破壊基準(b)として示した．図中(A)，(B)，(C)と記した点は，図6(b)において(A)，(B)，(C)と記した要素が破壊するときの応力及び歪を表示している．図によると，破壊開始の直後，すなわち，クラックが隣接する繊維に到達する直前までにかかなり明らかな複合材料としてのヤング率の低下がみられ，その後，クラックが隣接する繊維にそって進行する段階になると (B) から (C) へ，あまりヤング率の低下は

みられず、むしろ要素を更に破壊させるに必要な応力はクラックが隣接する繊維に到達した時点あたりからかなり大きくなる。これは隣接する繊維が crack arrester として作用していることを示すものと言えよう。

### 3. ま と め

マトリックスの破壊基準として界面剪断応力および最大主応力を選び、不完全加工複合材料の繊維端末付近におけるクラックの進行のシミュレーションを行なった。計算結果は、実験で得られた破壊のパターンのうち、若干のものについてそのまま説明できた。他の若干のものについては、破壊基準の組み合わせにより説明できると考える。なお前後するが、複合材料の破壊基準を確立するには、上記破壊基準以外に、剪断弾性歪エネルギー、最大剪断応力などを破壊基準にとり、同様の作業を行なって実験と比較する必要がある。

次に、隣接する繊維が crack arrester として働らくかどうかという点では、働らくと言って良いであろう。この現象は複合材料の利点として評価してよいと思われる。

以上、有限要素法を用いて複合材料の破壊についてその一部を解明したが、有限要素法によって破壊現象がどの程度まで解明できるかは、今後の系統的な実験と計算に待つ必要がある。

1974年5月7日 材料部

### 参 考 文 献

- [1] 林 毅編：複合材料工学，日本科学技術連盟（1971）。
- [2] J. Mullin, J. M. Berry & A. Gatti: Some Fundamental Fracture Mechanisms Applicable to Advanced Filament Reinforced Composites, J. Comp. Mat., 2 (1968), 82.
- [3] J. O. Outwater & M. C. Murphy: Fracture Energy of Unidirectional Laminates, Modern Plastics, (Sept. 1970), 160.
- [4] A. Kelly & W. R. Tyson: Tensile Properties of Fibre-Reinforced Metals; Copper/Tungsten and Copper/Molybdenum, J. Mech. Phys. Solids, 13 (1965), 329.
- [5] R. W. Jech: Influence of Fiber Aspect Ratio on the Stress-Rupture Life of Discontinuous Fiber Composites, NASA TN D-5735 (1970).
- [6] J. L. Helfet & B. Harris: Fracture Toughness of Composites Reinforced with Discontinuous Fibers, J. Mater. Sci., 7 (1972), 494.
- [7] 福田 博：不連続繊維強化複合材料の内部応力，剛性，強度に関する研究，学位論文（東京大学），（1972）。
- [8] 福田 博，河田幸三：繊維端末を有する複合材料の破壊の発生と進行について，第6回複合材料シンポジウム（日科技連），（1973），179。